

纳米碳混合层对土壤水分入渗特性及水分分布影响

薛文强¹, 周蓓蓓¹, 毛通¹, 陈晓鹏¹, 王全九^{1,2}

(1. 西安理工大学, 西北旱区生态水利工程国家重点实验室培育基地, 西安 710048;

2. 中科院水利部水土保持研究所, 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 通过室内一维垂直土柱试验, 利用 TDR 和张力计分别研究土壤中纳米碳混合层对土壤水分入渗特性、土壤水分分布以及纳米碳混合层对土壤水分特征曲线的影响。结果表明: (1) 随着入渗时间的增加, 含有纳米碳的土壤在相同入渗时间内累积入渗量减少, 湿润锋推进距离明显减小, 施加纳米碳具有明显的减渗作用。利用 Philip 入渗模型拟合入渗数据, 吸渗率 S 随着纳米碳含量的增加而减小, 随着纳米碳含量的增加, 水分入渗初期的累积入渗量逐渐减小。对湿润锋分层进行线性拟合, 在湿润锋进入第 2 层土壤时, 入渗速率有了显著的降低, 纳米碳混合层有着明显的阻水效果。(2) 随着纳米碳的加入, 纳米碳混合层的含水量明显提高, 纳米碳混合层下层的土壤含水量相对于空白对照组土壤含水量更低; 当纳米碳含量为 0.5% 时, 纳米碳混合层的土壤含水量达到最大值。(3) 随着纳米碳的施入, 在土壤脱湿状态下, 能显著提高土壤的持水能力, 运用 van Genuchten 模型对水分特征曲线进行拟合, 公式中的土壤的滞留含水率、饱和含水率及与进气值相关系数较不加纳米碳的土壤明显增加, 形状系数 n 则小于不加纳米碳的土壤。

关键词: 纳米碳混合层; 土壤水分特征曲线; 土壤持水性; 土壤水分分布

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2018)03-0152-08

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2018.03.024

Influence of Nano-carbon Composite Layer on Soil Water Infiltration and Water Distribution

XUE Wenqiang¹, ZHOU Beibei¹, MAO Tong¹, CHEN Xiaopeng¹, WANG Quanjiu^{1,2}

(1. State Key Laboratory Base of Eco-hydraulic Engineering in Arid Area, Xi'an University of

Technology, Xi'an 710048; 2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Science and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100)

Abstract: The effects of nano-carbon on soil water infiltration, soil water characteristic curve and soil water distribution were studied by TDR and tensiometer through one dimensional vertical soil column test. The results showed that: (1) With the increasing of infiltration time, the cumulative infiltration amount of the soil contained nano-carbon decreased in the same infiltration time, and the advancing distance of wetting front decreased obviously, and the application of nano-carbon presented obvious infiltration reduction effect. Using Philip infiltration model to fit infiltration data, the infiltration rate S decreased with the increasing of nano-carbon content, meanwhile with the increasing of nano-carbon content, the cumulative infiltration amount decreased gradually in the early stage of water infiltration. The linear fitting of wetting front in different layers showed that infiltration rate decreased significantly when wetting front entered second layers of soil, and nano-carbon layer had obvious effect of water blocking. (2) Adding nano-carbon, the water content of nano-carbon composite layer increased obviously, and soil water content in the lower layer of the nano-carbon composite layer was lower than that in the blank control group. When the nano-carbon content was 0.5%, the soil water content of the nano-carbon composite layer was the maximum. (3) Adding nano-carbon could significantly improve the water holding capacity of soil when the soil was under dehydration condition; the soil water characteristic curves were fitted using the van Genuchten model, and the soil water retention rate(θ_r), saturated water content (θ_s) and the correlation coefficient (α) of the formula significantly increased compared with the soil without nano-carbon, and

收稿日期: 2017-12-15

资助项目: 国家自然科学基金项目(51239009, 41371239); 陕西省科技支撑项目(2013KJXX-38); 陕西省自然科学基金项目(2015JQ5161); 西安理工大学特色研究计划项目(2016TS013)

第一作者: 薛文强(1995—), 男, 硕士, 主要从事农业水土环境与生态环境研究。E-mail: 925765585@qq.com

通信作者: 周蓓蓓(1982—), 女, 博士, 教授, 主要从事农业水土与生态环境研究。E-mail: happyangle222@gmail.com

the shape coefficient n was smaller than that of the soil without nano-carbon.

Keywords: nano-carbon; soil water characteristic curve; soil water holding capacity; soil water distribution

我国人地矛盾突出,有限的土地资源在很大程度上制约着经济的发展繁荣,且由于特殊的自然地理条件,极易发生水土肥流失^[1]。一方面,我国水土流失现象日益严重,造成耕地面积减少、土壤肥力降低、作物产量减少;另一方面,群众迫于生计开始大肆开垦土地,多种少收,造成了“越穷越垦、越垦越穷”的恶性循环,加剧了生态环境的进一步恶化。陕北地区的土壤多为风沙土,土壤孔隙较大,导致土壤质地疏松,保水保肥能力较差,该地区脆弱的生态系统已严重制约黄土区农业生产效益及生态环境的健康发展。众多研究^[2-7]发现,黄土地区土壤质量退化的重要原因是坡地的水土流失所导致的表层土壤的养分等的流失。自建国以来国内众多学者为了解决这一问题进行了大量室内外试验及理论分析,积累了大量宝贵的试验数据,取得了一定的成果。同时国家也对该地区投入了大量的人力、物力和财力,自1999年开始实施退耕还林(草)、封山育林以及荒山造林等大规模植被建设^[8],然而由于该地区土壤颗粒粒径大、土质松软、持水性差,众多措施未能从根本上解决问题。

纳米科技作为一种在农业和土壤行业的新技术应运而生,通过微观的手段直接操作和安排分子、原子来创制新的物质,从而彻底的改造现有的实际农业生产体系^[9]。碳元素与其他纳米材料对比,碳元素在大气—土壤—植被系统中普遍存在,具有极高的环境友好性及化学稳定性^[10-12],在作物生长及重金属污染的土壤治理方面,纳米材料具备较强的改善能力。Lecoanet等^[13]通过室内扰动土柱试验发现,重金属在加入纳米碳的砂土中的迁移速率仍大于壤土和黏土,且穿透性能随土壤中纳米碳含量增加而减小;Li-an等^[14]向扰动土柱内添加纳米碳进行研究,结果表明土壤中纳米碳的存在可大大提高土壤的阳离子交换量(cation exchange capacity, CEC),一定程度影响土壤对离子的吸附量;Tan等^[15]在黄绵土中加入不同含量的纳米碳,发现纳米碳对土壤水分入渗有显著影响,且随纳米碳含量增加,土壤饱和导水率和饱和含水量增加。在内在机理方面,纳米碳对于土壤水分运动的方面还较为空白。纳米碳材料具有高比表面积、小尺寸特性及高吸附性等特殊的性质^[16-17],在土壤水分养分流失的研究中应用纳米碳材料,能通过施加纳米碳来使土壤粒间结构改善,将有新的理论依据作用于改善黄土地区水肥流失方面。谭帅等^[18]依据室内土柱试验发现,风沙土与纳米碳均匀混合后,

入渗速率降低。本文拟将纳米碳作为土壤改良剂应用于陕北地区土壤中,通过室内土柱试验,研究土壤中层施不同含量纳米碳对土壤水分入渗特性及水分分布的影响,拟为纳米碳在改善土壤的理化性质、提高土壤保水保肥性及改善黄土高原水土肥流失等方面提供有力的参考依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

本文中对纳米碳混合层对土壤水分入渗特性及水分分布的影响开展研究,所需的土壤水分运动基础试验于2017年4—6月在西安理工大学农业工程试验场进行。试验所用土壤均取自中国科学院神木侵蚀与环境试验站,位于陕西省神木市六道沟流域,该区域海拔1 081.0~1 273.9 m,平均气温8.4℃,年降水量408.5 mm,其中6—9月降水量占全年的80.93%,而且多为暴雨,最大年降水量819.11 mm,最小106.8 mm,最大日降雨量为13 mm,降水年际变化大。将取回土样置于阴凉处干燥、风干,去除土样中的枯枝、残留物,用研钵碾碎,过2 mm筛以留备用。土壤粒径组成利用英国马尔文公司生产的Mastersizer 2000激光粒度分析仪进行测定,土壤黏粒(0.001 mm)、粉粒(0.001~0.05 mm)、砂粒(>0.05 mm)含量分别为2.296%,9.273%,88.431%,pH为8.0,有机质、全磷、全氮含量分别为13.12,0.62,0.41 g/kg。按国际制土壤质地分类标准,试验土样为砂土。

1.2 试验方法

1.2.1 土壤水分特征曲线测定试验 试验选用玻璃土柱(内径20 cm,高度20 cm,底部均匀开孔),在土柱中分层(1~5,5~10,10~15,15~20 cm)插入张力计负压管,监测纳米碳混合层上、中、下土壤水势能的变化过程。共进行6组试验,2次重复。已有研究^[19]表明,纳米碳施加量从0~1%对土壤水分运动影响较大,故本试验设置梯度为0~1%,以此研究土壤水分运动。在一维垂直玻璃土柱中,装填土高度20 cm,分层填装。其中,5~10 cm为纳米碳混合层(纳米碳—土混合质量比例为0,0.1%,0.3%,0.5%,0.7%,1.0%,分别用0 NC,0.1% NC,0.3% NC,0.5% NC,0.7% NC,1.0% NC表示);对土柱进行湿润,将装好的土柱先放在盛有薄层蒸馏水的水槽中,让土柱自动吸水湿润,待土柱表面湿润后,再使土柱在水中浸泡48 h(土柱湿润过程中,为防止表土水

分蒸发,用一层塑料薄膜覆盖土柱);48 h 后,将已浸泡好的土柱从水中取出,并抬高放置 48 h,以使土柱中的重力水排出;将张力计负压管一端的陶土头在煮沸过的蒸馏水(冷却后)中浸泡 8~10 h,使得陶土头孔隙充满水,然后在张力计腔体中徐徐注入经煮沸后冷却的无气水,水位离腔口处 1 cm 即可,用抽气管进一步抽尽水中溶解的气体,以减少对试验精度的影响,塞上胶塞;将校准过得张力计负压管插入土柱中,其中,负压管一段陶土头埋深分别为 1~5,5~10,10~15,15~20 cm,即纳米碳混合层以上、中部、以下 3 个位置;试验开始后,每天称量土柱重量变化和记录张力计的负压读数,测定时间为每天 2 次(8:00,20:00),试验持续到张力计测量的最低值停止,装置示意图 1a。

1.2.2 一维垂直入渗土壤剖面含水量测定试验

试验选用特制的一维垂直玻璃土柱,土柱侧壁开孔,安装 TDR 水分监测传感器,安装高度为 2.5,5,7.5,10,12.5 cm 共 5 个,实时监测纳米碳混合层上、中、下土壤水分变化情况。TDR 监测时间间隔 1 min(由于数据量较大,故将绘图中部分试验点去掉)。

在一维垂直玻璃土柱中,装填土高度 40 cm,分层填装。其中,5~10 cm 为纳米碳混合层(纳米碳—土混合质量比例为 0,0.1%,0.3%,0.5%,0.7%,1.0%);利用土柱侧壁开孔,将 TDR 水分监测传感器插入土柱中,接通电源和信号接收端;定水头积水入渗,水头高度 2 cm,定时间记录马氏瓶水位和湿润锋推进位置,TDR 以一定的时间步长记录土壤水分瞬时变化情况;试验结束后,通过含水率变化过程分析土壤含水量变化特征,装置示意图 1b。

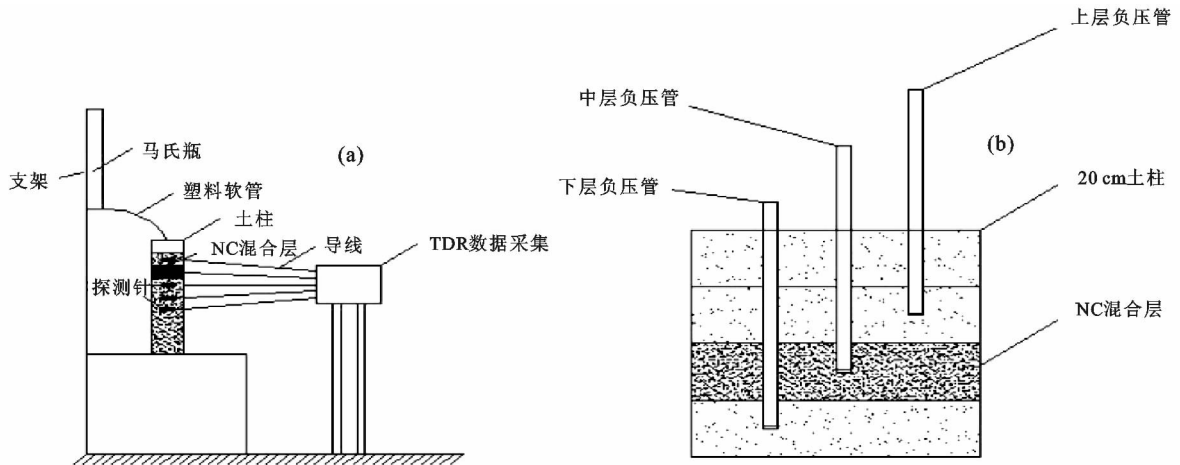


图 1 土柱剖面土水势能变化特征测定试验与瞬时含水量测定试验装置示意

1.3 基本原理

1.3.1 入渗模型 土壤入渗模型中 Philip^[20]模型应用广泛,公式形式简单,物理意义明确,计算公式为:

$$I = St^{0.5}$$

式中: I 为累积入渗量(cm); S 为土壤吸渗率($\text{cm}/\text{min}^{0.5}$); t 为入渗时间(min)。

1.3.2 土壤水分特征曲线 土壤水分特征曲线的影响因素复杂,至今没有从理论上建立土壤含水量和土壤基质势之间的关系,通常采用经验公式来描述。最常用的经验模型是 van Genuchten 模型,计算公式为^[21]:

$$\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left(\frac{1}{1 + (ah)^n} \right)^m$$

式中: θ 为土壤含水率(cm^3/cm^3); θ_r 为滞留土壤含水率(cm^3/cm^3); θ_s 为饱和土壤含水率(cm^3/cm^3); h 为土壤吸力(cm); a 为与进气值相关的系数; n 和 m 为形状系数,且 $m = 1 - 1/n$ 。

2 结果与分析

2.1 纳米碳混合层对土壤水分入渗特性影响

2.1.1 纳米碳混合层对累积入渗量的影响

分入渗时间与累积入渗量在一定程度上反映了土壤水分入渗能力^[22]。由图 2 可知,在入渗初期不同浓度纳米碳处理下累积入渗量的变化趋势差异较小。随着入渗时间的增加,在入渗 60 min 后,由于含有纳米碳的土壤总孔隙度减小,使得相同入渗时间内累积入渗量减少。当土壤入渗时间为 300 min 时,不添加纳米碳的土壤累积入渗量为 27.3 cm,而添加不同含量纳米碳时的土壤累积入渗量依次为 25.5 cm(0.1% 纳米碳),23.6 cm(0.3% 纳米碳),24.2 cm(0.5% 纳米碳),22.3 cm(0.7% 纳米碳),22.9 cm(1.0% 纳米碳)。由此可见,施加纳米碳具有明显的减渗作用,且当施加 0.7% 纳米碳时效果最明显,当施加 1.0% 浓度纳米碳时,土壤累积入渗量较施加 0.7% 纳米碳时有一定增加,这说明施加纳米碳的浓度对阻碍土壤水分入渗的效果并不是越高越好,而是在施加 0.7% 浓度纳米碳时达到峰值,再施加更高浓度纳米碳时,累积入渗量不再减少。

为了进一步分析和验证纳米碳混合层对土壤水分运动的影响,利用 Philip 入渗模型拟合入渗数据,

获取表征土壤水分入渗能力的重要参数,其中参数大小主要取决于入渗时土壤结构。由表 1 可知,各处理 R^2 均大于 0.96, Philip 入渗模型对纳米碳混合层的土壤水分入渗过程模拟结果较好。吸渗率 S 随着纳米碳含量的增加而减小,说明随着纳米碳含量的增加,水分入渗初期的累积入渗量逐渐减小。0.7% 纳米碳时吸渗率 S 明显低于不加纳米碳时,表明此时对土壤表层水分入渗的阻碍效果明显,继续增加纳米碳含量时,吸渗率 S 并无明显下降。通过对拟合结果进行显著性检验(单因素方差分析, $P<0.05$), 纳米碳施加量与吸渗率 S 存在极显著相关关系。

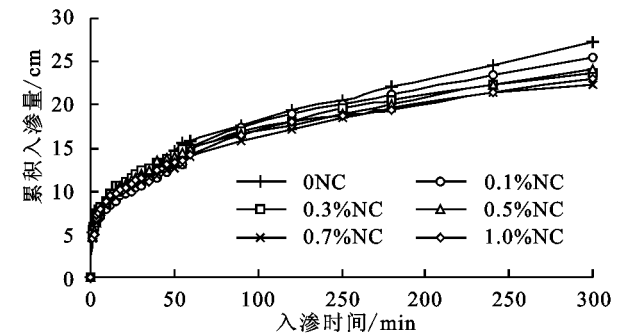


图 2 纳米碳混合层对累积入渗量的影响

表 1 Philip 公式参数拟合

纳米碳 含量/%	吸渗率 S / ($\text{cm} \cdot \text{min}^{-0.5}$)	决定系数 R^2
0	1.3672	0.98
0.1	1.3197	0.98
0.3	1.1960	0.97
0.5	1.2152	0.96
0.7	1.1490	0.96
1.0	1.1597	0.97

2.1.2 纳米碳混合层对湿润锋运移的影响 湿润锋是指水分下渗过程中,土壤被湿润的先头部位与土层形成的明显交界面,是反映下渗水流的垂向运动特征之一^[21]。由图 3 可知,湿润锋运移深度随入渗时间的增加而逐渐增加,其变化规律与累积入渗量一致。在入渗初期,不同含量纳米碳的施加对湿润锋推进距

离影响不大,重合度很高。在 90 min 时,不同纳米碳浓度的施加对湿润锋运移的影响开始出现,施加纳米碳的土壤湿润锋推进距离明显减少。在入渗结束时,不添加纳米碳的土壤湿润锋运移距离为 38.5 cm,不同纳米碳含量下的土壤湿润锋运移距离依次为 37 cm(0.1% NC),36.2 cm(0.3% NC),35.4 cm(0.5% NC),34.2 cm(0.7% NC),36.5 cm(1.0% NC)。可以看出施加 0.7% 纳米碳时湿润锋推进量由 38.5 cm 降低至 34.2 cm,减少幅度最大。由此可见,施加纳米碳可以减缓对水分的推移,对保持土壤水分有着显著的成效。

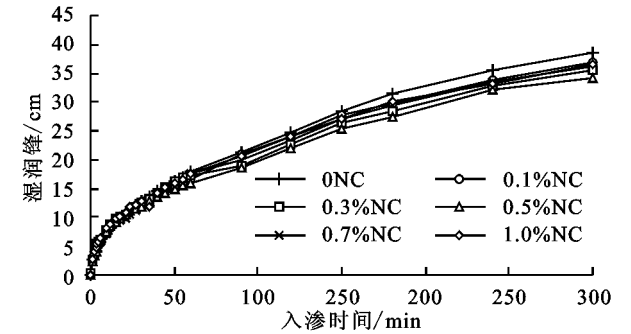


图 3 纳米碳混合层对湿润锋运移的影响

为进一步分析纳米碳对水分在土柱中的迁移过程,利用线性关系 $Z=at+b$ 分段拟合湿润锋在不同土层随时间运移过程,式中: Z 为湿润锋(cm); a 为在某土层运移的平均速率(cm/min); t 为时间(min); b 为拟合参数。第 1 层为砂土层 0—5 cm,第 2 层为纳米碳混合层(5—10 cm),第 3 层为砂土层 10—40 cm。由表 2 可知,当加入纳米碳混合层,湿润锋在第 1 层的入渗速率较空白组有所增加,这主要由于加入纳米碳混合层后,第 2 层土壤水吸力变大,加速了纳米碳混合层上方的湿润锋入渗速率。在湿润锋进入第 2 层土壤时,入渗速率有了明显的降低,且随着纳米碳含量的增加,入渗速率降低的越明显,纳米碳混合层有着明显的阻水效果。通过对拟合结果进行显著性检验(单因素方差分析, $P<0.05$), 纳米碳施加量与入渗率存在显著相关关系。

表 2 湿润锋随时间运移的线性关系参数

纳米碳 含量/%	a			b			R^2		
	第 1 层	第 2 层	第 3 层	第 1 层	第 2 层	第 3 层	第 1 层	第 2 层	第 3 层
0	0.65	0.32	0.103	2.15	4.12	10.72	0.991	0.993	0.969
0.1	0.58	0.29	0.099	2.74	4.46	10.28	0.922	0.976	0.969
0.3	0.63	0.26	0.097	2.25	4.69	10.22	0.969	0.906	0.964
0.5	0.76	0.29	0.090	2.26	4.85	10.82	0.957	0.936	0.969
0.7	0.81	0.27	0.088	1.77	4.86	10.16	0.997	0.978	0.977
1.0	0.79	0.26	0.094	2.15	5.41	10.80	0.973	0.949	0.964

2.2 纳米碳混合层对土壤水分分布的影响

2.2.1 纳米碳对土壤剖面含水量分布的影响 由图 4 可知,在不施加纳米碳的土柱中,随着水分的入渗,各层的瞬时含水量都在逐渐上升,由于没有纳米碳的阻水

与持水作用,土柱各层随着入渗,在 300 min 时都达到了饱和含水量。其余各层由于纳米碳的加入,各层的土壤含水量都出现了分层现象。随着纳米碳含量的逐渐增加,分层现象越来越明显。在同一纳米碳梯度下进行

分析,土壤 0—5 cm 层含水量始终最大,这是由于水分的持续入渗,表层土壤处于过饱和状态。土壤 5—10 cm 含水量接近于表层土壤含水量,这是由于该层土壤为纳米碳—土混合层,增强了土壤的持水性。土壤 10—15 cm 由于接近纳米碳混合层,纳米碳混合层所下渗的水分,也将被保持在这一土层的土壤中,所以该层土壤的含水量与纳米碳混合层的土壤含水率相当。土壤 15—20 cm 层,处于土柱的下部,水分下渗过程中,纳米碳混合层吸持大量的水分,并减少了向下渗漏,所以该层含水率较小。土壤 20—25 cm 层处于土柱的最下层,在一定时间内,下渗到该层的水分本来就较小,又由于上层

土壤中纳米碳对水分的吸持作用,该层的含水率在各个纳米碳施加状态下含水率均处于最小值。这可能由于加入纳米碳后,土壤中的黏粒比例升高,改变了土壤原有的结构,而且纳米碳的细粒径特性,具有极大的表面积,表面能极高,加入纳米碳后土壤中的小孔隙增多,水分流动路线变得弯曲,纳米碳混合层基质吸力增大,导致纳米碳混合层上方土壤入渗速率加大,所以在纳米碳混合层上方的土壤含水率较高。随着水分的继续下渗,当水分运动到纳米碳混合层的下方时,土壤水分入渗速率明显减小,随着水分的下渗,在越靠下的土层中,土壤含水量越来越低。

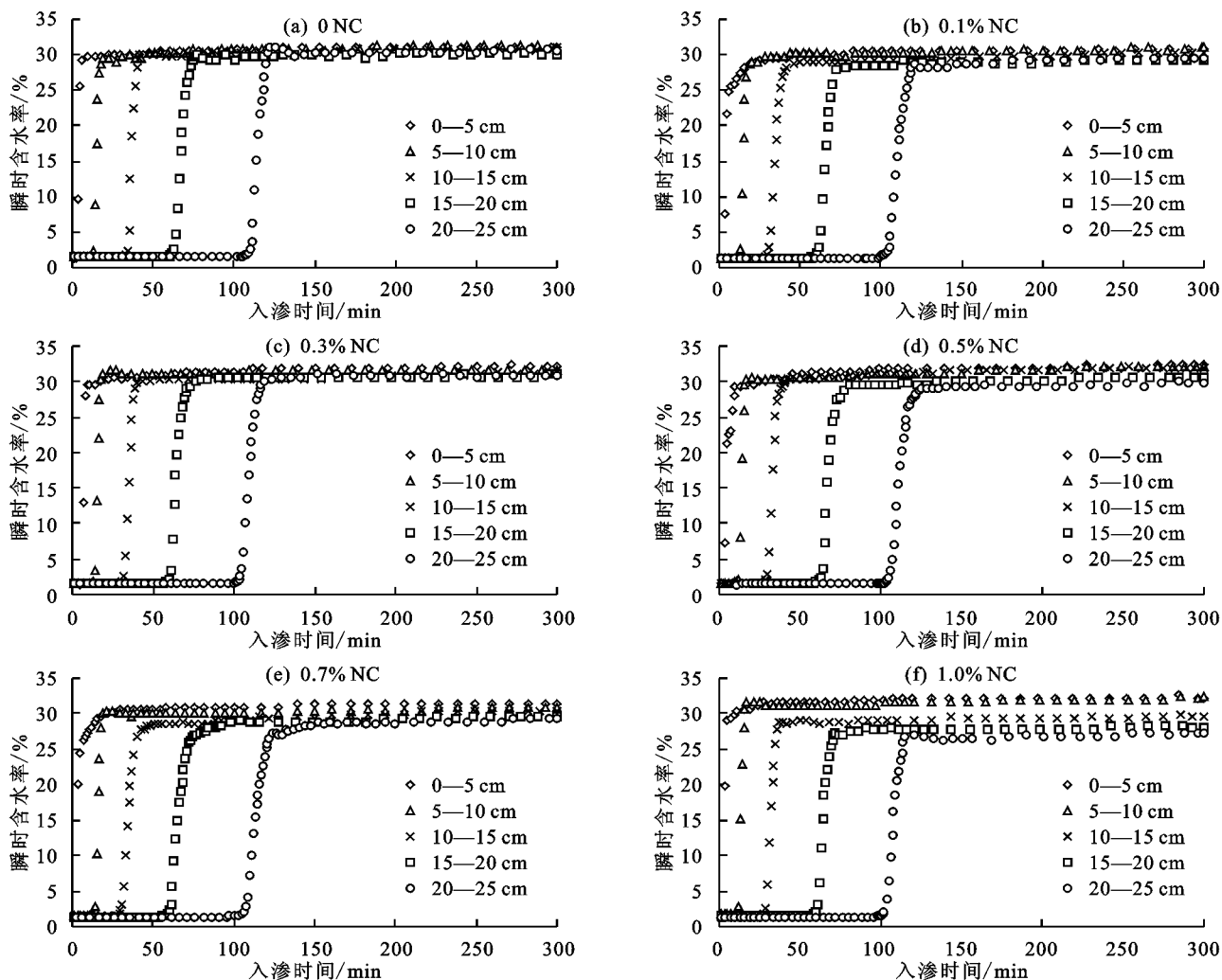


图 4 各处理间土壤剖面含水率变化过程

2.2.2 纳米碳混合层对各分层状态下土壤剖面含水量分布的影响 对试验数据进行重新处理,将试验分为 3 层(土壤表层、纳米碳—土混合层和土壤层),研究在同一深度不同质量比纳米碳对土壤含水量变化的影响。随着土壤深度的增大,各层土壤的含水率的初始上升点都在后延(图 4)。由图 5 可知,在土壤表层(0—5 cm)的土壤中,土壤的各层含水量随纳米碳的增加并没有发生明显变化,这是由于在土壤表层随

着水分的持续入渗,最表层的土壤达到了过饱和的状态。在纳米碳—土混合层(5—10 cm)和土壤层(10—15, 15—20, 20—25 cm)中的土壤中,随着纳米碳施加量的增加,土壤含水量在 0 纳米碳至 0.5% 纳米碳的施加过程中持续增加,在 0.5% 纳米碳至 1.0% 纳米碳的施加过程中土壤含水量的变化不明显。随着土壤深度的增加,达到同一含水量状态下,0.5% 的质量比纳米碳的入渗用时最短,也能说明 0.5% 质量比纳

米碳能够最有效的增强土壤的吸水和保水能力。同一深度条件下,随着质量比纳米碳的增加,土壤的饱和含水率由小逐渐增大,在 0.5% 质量比的纳米碳施加中,土壤的饱和含水率最高。

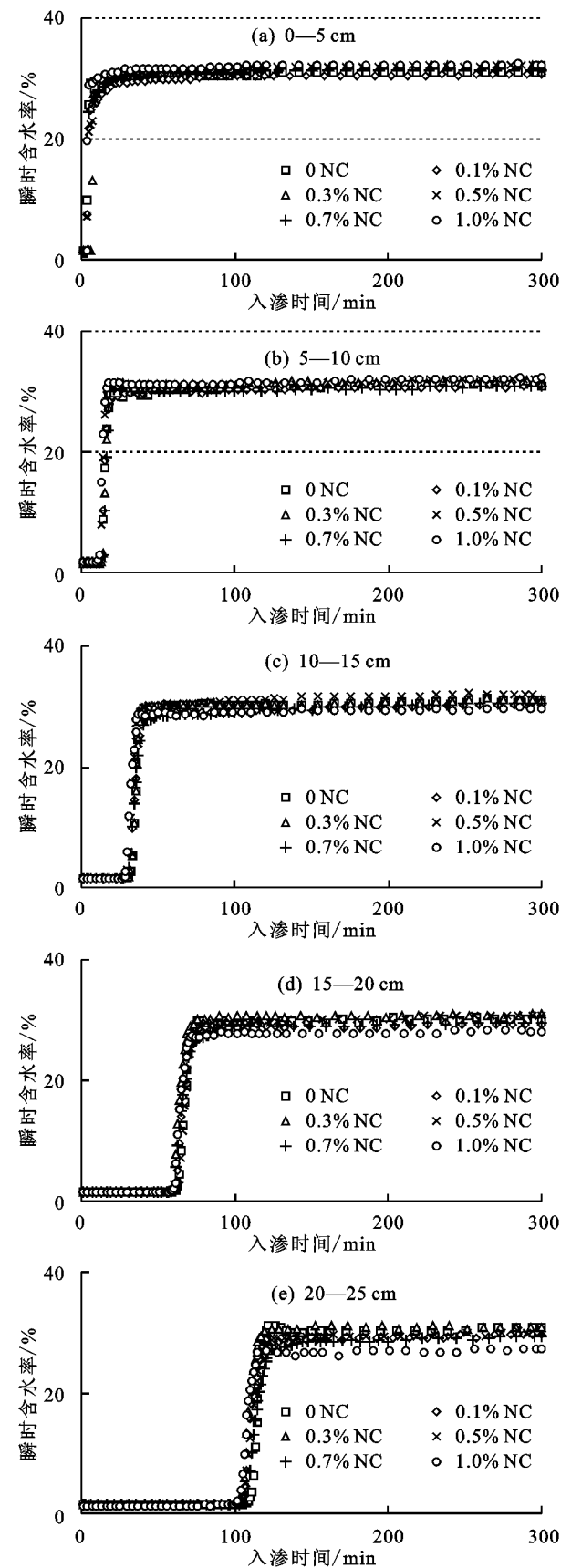


图 5 施加不同质量比纳米碳土壤的含水率

随后,随着纳米碳含量的增加土壤含水率不再发生明显变化。这是由于纳米碳的粒径特别小,增加了土壤中的黏粒比例,改变了土壤原有结构,且纳米碳的表面积极大,表面能极高,能够有效地吸持住入渗土壤中的水分,增大土壤的持水能力。但这一特性并不随着纳米碳含量的持续增加而增加。

综合分析图 4、图 5 可知,随着施加纳米碳含量的增加,土壤的含水量在 0—5 cm 基本保持一致,在最上层的土壤中,随着水分的入渗,土壤含水率保持在饱和的状态。在 5—10 cm,即含有纳米碳混合层的土壤中,土壤的含水量随着纳米碳含量的增加,该层的含水量出现了增加的趋势。一方面添加纳米碳后,土壤中大孔隙的数量降低,小孔隙的数量增加,与大孔隙时相比,保持水分的能力较强;另一方面,细粒径的纳米碳相当于增加了土壤中的黏粒比例,改变了土壤的结构,而且由于纳米碳具有极大的比表面积,表面能极高,对水分有较高的吸持力。在纳米碳混合层以下,由于纳米碳混合层的本身的持水性与阻水性,下层土壤(10—15,15—20,20—25 cm)含水量相比于空白对照组和纳米碳混合层含水量都有所下降。

2.3 纳米碳混合层对土壤水分剖面势能及其参数的影响

土壤水分特征曲线是表示土壤水吸力与土壤含水率的关系曲线,表示土壤水的能量和数量之间的关系,是研究土壤水分的保持和运动所用到的反应土壤水分基本特征的曲线^[21]。上文中虽已获得纳米碳可显著增加土壤剖面含水量,但其势能究竟如何变化不得而知。因此,为研究层施纳米碳对土壤剖面势能的变化,本部分分为 3 层(0—5,5—10,10—15 cm)进行研究在同一深度不同质量比纳米碳对土壤势能吸力变化的影响。由图 6 可知,随着纳米碳含量的逐渐增加,土壤的含水量都出现了先增加后减少的趋势。同一深度下,在 0,0.1%,0.3%,0.5% 纳米碳中,随着土壤含水率的逐渐减小,土壤水吸力趋势均出现了较大的增幅。但随着纳米碳增至 0.5% 的过程中,土壤水含量出现了增加的趋势,从而土壤水的吸力出现了减少的趋势。在 0.7%,1.0% 的纳米碳中,土壤含水量出现了相对于 0.5% 纳米碳的下降,从而导致土壤水的吸力变大;在含水率较高的条件,随着纳米碳含量的逐渐增加,土壤水吸力逐渐变大;在含水率较低的条件,随着纳米碳含量的逐渐增加,土壤水吸力逐渐变小。

进一步分析曲线可知,增加纳米碳含量时,相同

土壤含水量下的水吸力增大,水分特征曲线愈加陡直,即随吸力增加,土壤含水量的减小量变小。说明在土壤水分特征曲线的有效吸力范围内,添加纳米碳后土壤持水能力有所提高。这可能由于纳米碳增加了土壤中的小孔隙数量,随着吸力的增加,相比于大孔隙中的水分,外界对小孔隙中的水分影响较小,增强了土壤的持水性能。细小的纳米碳颗粒相当于增加了土壤中的黏粒比例,改变了土壤的原有结构,且纳米碳具有巨大的比表面能,增强了土壤的持水性能。这一增强土壤水持水能力的性质,在施加 0.5% 质量比纳米碳的土壤中最强,随后,随着纳米碳含量的提高,这一增强趋势不再明显。

利用 van Genuchten 模型对水分特征曲线进行拟合。由表 3 可知,再添加纳米碳后,不同土层深度的土壤在 van Genuchten 公式中的土壤滞留含水率 θ_r 均大于不添加纳米碳时的土壤滞留含水率 θ_r ,且随着纳米碳含量的增加其参数越大,当加入 0.5% 含量纳米碳时,土壤滞留含水率 θ_r 达到最大值。这表明再加入纳米碳时,土壤在水势很低的时候可以保持的水分得以增加。添加了纳米碳的土壤,其饱和含水率 θ_s 均大于不添加纳米碳的土壤,这主要由于纳米碳增加了土壤中的小孔隙数量,吸力增加,外界对小孔隙中的水分影响相比于大孔隙中的水分小,故增强了土壤的持水性能,进而导致土壤饱和含水率 θ_s 的增加。表 3 中与进气值有关的参数 α 也均大于不加纳米碳时的土壤,形状系数 n 均小于不加纳米碳时的土壤。

表 3 不同土层深度土壤 van Genuchten 公式参数拟合

纳米碳 含量/%	与进气相关的系数 α			形状系数 n			决定系数 R^2		
	0—5 cm	5—10 cm	10—15 cm	0—5 cm	5—10 cm	10—15 cm	0—5 cm	5—10 cm	10—15 cm
0	0.00292	0.00327	0.00299	3.77339	5.29338	4.11478	0.98	0.97	0.99
0.1	0.00330	0.00332	0.00353	5.29833	5.32990	5.72111	0.97	0.99	0.97
0.3	0.00341	0.00342	0.00343	5.09024	4.98718	4.79817	0.98	0.98	0.98
0.5	0.00339	0.00343	0.00347	4.69968	4369698	4.77437	0.99	0.98	0.98
0.7	0.00337	0.00344	0.00358	4.21297	4.44737	4.76083	0.98	0.99	0.99
1.0	0.00337	0.00341	0.00342	4.07147	4.05425	4.02038	0.98	0.98	0.98

3 结 论

(1)在入渗初期不同浓度纳米碳处理下累积入渗量的变化趋势差异较小。在入渗 60 min 后,由于含有纳米碳的土壤总孔隙度减小,使得相同入渗时间内累积入渗量减少。不同纳米碳浓度的施加对湿润锋运移的影响较为明显,施加纳米碳的土壤湿润锋推进距离明显减少。利用 Philip 入渗模型拟合入渗数据,各处理 R^2 均大于 0.96,吸渗率 S 随着纳米碳含量的增加而减小,说明随着纳米碳含量的增加,水分入渗初期的累积入渗量逐渐减小。对湿润锋分层进行线性拟合,在湿润锋进入第 2 层土壤时,入渗速率有了显著的降低,纳米碳混合层有着明显的阻水效果。

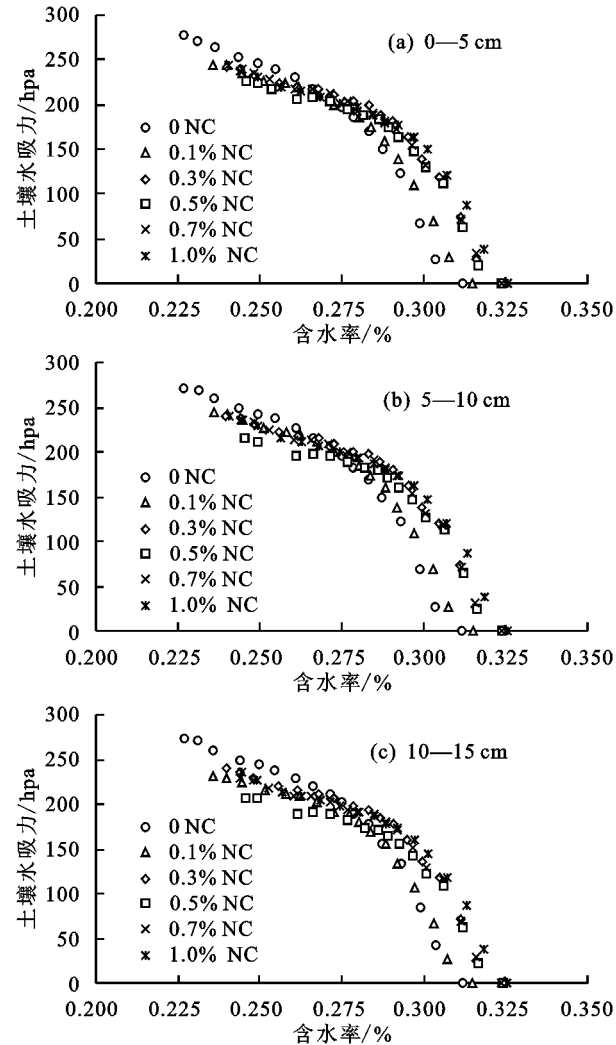


图 6 纳米碳对土壤水分特征曲线的影响

(2)在 TDR 测土壤含水量的试验中,在同一纳米碳梯度下,0—5 cm 土层含水量始终最大,表层土壤处于过饱和状态。5—10 cm 土层含水量接近于表层土壤含水量,该层土壤为纳米碳—土混合层,增强了土壤的持水性。10—15 cm 土层由于接近纳米碳混合层,纳米碳混合层所下渗的水分被保持在这一土层的土壤中,该层土壤的含水量与纳米碳混合层的土壤含水率相当。15—20 cm 土层,处于土柱的下部,水分下渗过程中,纳米碳混合层吸持大量的水分,减少了向下渗漏,含水率较小。20—25 cm 土层处于土柱的最下层,一定时间内下渗到该层的水分较小,加之上层土壤中纳米碳对水分的吸持作用,该层含水量均处于最小值。在纳米碳混合层附近的土壤含水率明显高于纳米碳下层,随着纳米碳的持

续施加,这一特性也在0.5%的纳米碳施加过程中达到了最值,随后继续添加纳米碳,土壤中保持的水分也没有发生明显的变化。

(3)在脱湿状态下,土壤中施加纳米碳能够将水分保持在地表以下一定范围附近,阻止了水分的深层渗漏,有利于保持土壤水分。纳米碳体现出增强土壤持水性的能力,随纳米碳含量的升高,持水能力愈强,但纳米碳对增加土壤含水量不是一个线性关系,随着纳米碳含量的增加会出现一个峰值,接着对土壤含水量的增加会出现削弱的作用。运用 van Genuchten 模型对水分特征曲线进行拟合,得出加入不同含量纳米碳时,土壤的滞留含水率、饱和含水率、与进气值相关系数有明显增加,形状系数 n 则小于不加纳米碳的土壤。本文着重研究了纳米碳混合层对土壤水分入渗的影响,结果表明将纳米碳作为土壤改良剂施入土壤中,明显减缓了风沙土水分入渗速率,可以有效降低土壤水分流失。

参考文献:

- [1] 方国华,钟淋涓,毛春梅.水污染经济损失计算方法述评[J].水利水电科技进展,2004,24(3):54-56.
- [2] 田卫堂.我国水土流失现状和防治对策分析[J].水土保持研究,2008,15(4):204-209.
- [3] 唐克丽,张仲子,孔晓玲,等.黄土高原水土流失与土壤退化研究初报[J].环境科学,1984,5(6):5-10.
- [4] 唐克丽,张仲子,孔晓玲,等.黄土高原水土流失与土壤退化的研究[J].水土保持通报,1987,7(6):12-18.
- [5] 郑粉莉.坡面侵蚀分带侵蚀过程与降雨—土壤水分转化、土壤退化关系的研究[J].土壤侵蚀与水土保持学报,1998,4(4):92-95.
- [6] 白红英,唐克丽,张科利,等.草地开垦人为加速侵蚀的人工降雨试验研究[J].中国科学院水利部西北水土保持研究所集刊.1993,17:87-93.
- [7] 张兴昌,邵明安.侵蚀条件下土壤氮素流失对土壤和环境的影响[J].土壤与环境,2000,9(3):249-252.
- [8] 张宝庆,吴普特.近30年黄土高原植被覆盖时空演变监测与分析[J].农业工程学报,2011,27(4):287-293.
- [9] 白春礼.纳米科技及其发展前景[J].科学通报,2001,46

(2),89-92.

- [10] 梅龙伟,张振华,丁开和.单壁碳纳米管电子输运特性的稳定性分析[J].物理学报,2009,58(3):1971-1979.
- [11] 王根伟.碳纳米管稳定性及其复合材料的制备和力学性质[D].太原:太原理工大学,2006.
- [12] 韩红梅,邱介山,周颖,等.碳纳米管的制备及其热稳定性和表面性质的研究[J].碳素技术,2001,115(4):5-9.
- [13] Lecoanet H F, Wiesner M R. Velocity effects oil fullerene and oxide nanoparticle deposition in porous media [J]. Environmental Science & Technology, 2004, 38(16): 4377-4382.
- [14] Liang B, Lehmann J, Solomon D, et al. Black carbon increases cation exchange capacity in soils [J]. Soil Science Society of American Journal, 2006, 70(5): 1719-1730.
- [15] Tan S, Zhou B B, Wang Q J. Effect of nanocarbon on the hydraulic parameters and the solute transport process for disturbed loessial soil [J]. Arabian Journal of Geosciences, 2016, 9(1): 1-13.
- [16] 于健,雷廷武.不同PAM施用方法对土壤入渗和侵蚀的影响[J].农业工程学报,2010,26(7):38-44.
- [17] Wang J, Fu B, Qiu Y, et al. Soil nutrients in relation to land use and landscape position in the semi-arid small catchment on the loess plateau in China [J]. Journal of Arid Environments, 2011, 48(4): 537-550.
- [18] 谭帅,周蓓蓓,王全九.纳米碳对扰动黄绵土水分入渗过程的影响[J].土壤学报,2014,51(2):263-269.
- [19] 周蓓蓓,陈晓鹏,吕金榜,等.纳米碳对不同植被覆盖下黄土坡地降雨侵蚀的抑制效果[J].水土保持学报,2017,33(2):116-124.
- [20] 吴军虎,陶汪海,王海洋,等.羧钾基纤维素钠对土壤团粒结构及水分运动特性的影响[J].农业工程学报,2015,31(2):117-123.
- [21] 史文娟,梁嘉平,陶汪海,等.添加聚谷氨酸减少土壤水分深层渗漏提高持水能力[J].农业工程学报,2015,31(23):94-100.
- [22] 张启昌,孟庆繁,兰晓龙.黄土低山丘陵区湿润锋运动的试验研究[J].土壤侵蚀与水土保持学报,1996,2(4):84-88.

(上接第151页)

- [21] Andréassian V. Waters and forests: From historical controversy to scientific debate[J]. Journal of Hydrology, 2004, 291(1/2):1-27.
- [22] 王彦辉.几个树种的林冠降雨特征[J].林业科学,2001,37(4):2-9.
- [23] 姚文艺,陈国祥.雨滴降落速度及终速公式[J].河海大学学报(自然科学版),1993,21(3):21-27.
- [24] 罗德.北京山区森林植被影响下的降雨动力学特性研究[D].北京:北京林业大学,2008.
- [25] 刘玉杰.天然落叶松林冠截留及林内雨延滞效应研究

[D].哈尔滨:东北林业大学,2016.

- [26] Nanko K, Mizugaki S, Onda Y. Estimation of soil splash detachment rates on the forest floor of an unmanaged Japanese cypress plantation based on field measurements of throughfall drop sizes and velocities [J]. Catena, 2008, 72: 348-361.
- [27] Nanko K, Onda Y, Ito A, et al. Spatial variability of throughfall under a single tree: Experimental study of rainfall amount, raindrops, and kinetic energy[J]. Agricultural & Forest Meteorology, 2011, 151(9): 1173-1182.